

富氧度和粒子浓度对硅橡胶绝热材料烧蚀行为影响对比

查柏林, 石易昂, 王金金, 苏庆东[✉]

(火箭军工程大学动力工程系, 西安, 710025)

摘要 为探究富氧度和粒子浓度对硅橡胶绝热材料烧蚀行为影响机理间的联系,基于自主研发的氧-煤油烧蚀试验系统,对某型硅橡胶基绝热材料进行了烧蚀试验。试验共设计有 0%、5%、9%、15%、20% 5 组富氧度条件,每组均设置 4%、6%、8%、10% 4 类粒子浓度,试验后测算各试样烧蚀率,并绘制了烧蚀率、富氧度和粒子浓度的三维曲面图,同时利用扫描电镜(SEM)对试样进行微观形貌研究。结果表明:在试验参数范围内,当富氧度一定时,随粒子浓度的增加,材料的 2 类烧蚀率均有所增大;而粒子浓度不变时,材料烧蚀率随富氧度的增加先上升后下降,在 9% 左右达到极值;粒子浓度直接影响材料表面的机械受力状况;富氧度影响材料中 SiO₂ 的生成速率,在低富氧度条件下, SiO₂ 的生成析出量无法全面包裹保护纤维,致使烧蚀率略有上升;而在高富氧度条件下,生成的 SiO₂ 附着在纤维丝表面加强了耐冲蚀性能,减缓了粒子破坏;粒子浓度对材料烧蚀行为的影响大于富氧度对材料烧蚀行为的影响,在开展的实验条件下,约是富氧度影响的 5 倍。

关键词 富氧度;粒子浓度;硅橡胶;烧蚀行为;烧蚀率

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2018.02.001

中图分类号 V258 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2018)02-0001-07

Comparative Study on the Effect of Oxygen-rich Condition and Particle Concentration on Ablation Behavior of Silicone Rubber Insulation Materials

ZHA Bailin, SHI Yiang, WANG Jinjin, SU Qingdong[✉]

(Power Engineering Department, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract: In order to investigate the influence mechanism of oxygen-rich condition and particle concentration on the ablation behavior of silicone rubber insulation, the ablation test of a certain type of silicone rubber based insulation material is carried out based on the self-developed oxygen-kerosene ablation test system. A total of 0%, 5%, 9%, 15% and 20% of the oxygen-rich conditions are designed, and each group is set with 4%, 6%, 8% and 10% particle concentration. The ablation rate of each sample is measured and the ablation rate, oxygen-rich condition and particle concentration are plotted. At the same time, the microstructure of the sample is analyzed by scanning electron microscopy (SEM). The results show that the ablation rate of the two kinds of materials increases with the increase of the particle concentration when the oxygen-rich condition is constant. When the concentration of particles is constant, the ablation rate of ma-

收稿日期: 2017-09-29

基金项目: 工信部基础产品创新计划(J-KY-2014-1047)

作者简介: 查柏林(1974—),男,湖北黄冈人,教授,主要从事飞行器推进系统材料研究。E-mail:zhabailin@163.com

通信作者: 苏庆东(1993—),男,河北张家口人,硕士生,主要从事飞行器推进系统材料研究。E-mail:epsuqingdong@163.com

引用格式: 查柏林,石易昂,王金金,等.富氧度和粒子浓度对硅橡胶绝热材料烧蚀行为影响对比[J].空军工程大学学报(自然科学版),2018,19(2):1-7. ZHA Bailin, SHI Yiang, WANG Jinjin, et al. Comparative Study on the Effect of Oxygen-rich Condition and Particle Concentration on Ablation Behavior of Silicone Rubber Insulation Materials [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2018, 19(2): 1-7.

materials increases first and then decreases with the increase of oxygen-rich condition and reaches the extreme at around 9% of the oxygen-rich condition; Particle concentration directly affects the mechanical stress of the surface of the material. The oxygen-rich condition affects the formation rate of SiO_2 in the material. Under conditions of low degree of oxygen-rich, the amount of SiO_2 could not be encapsulated in the protective fiber, resulting in a slight increase in ablation rate. And under conditions of high degree of oxygen-rich, the generated SiO_2 adhered to the surface of the filament, strengthens the erosion resistance and slows down the particle destruction. The effect of the particle concentration on the ablation behavior of the material is greater than that of the oxygen-rich condition on the ablation behavior of the material, which is about 5 times the degree of the influence of oxygen-rich condition under conditions of the experiments.

Key words: oxygen-rich condition; particle concentration; silicone rubber; ablation behavior; ablation rate

固体火箭冲压发动机补燃室内壁面绝热层材料的耐烧蚀能力将直接影响固冲发动机的整体性能。发动机正常工作时,补燃室内壁面不仅要耐受高温富氧的燃气烧蚀,而且还将遭受多相流燃气中粒子(主要为推进剂中 Al、Mg、B 等颗粒的燃烧产物)的侵蚀破坏,这对绝热层材料的耐烧蚀性能提出了较高的要求^[1]。硅橡胶绝热材料因其具有较好的耐富氧烧蚀性能、低廉的制造成本及较低的热导率等优点,被广泛用作固体火箭冲压发动机补燃室绝热材料。

由于绝热层材料对于发动机的正常工作具有重要意义,近年来,国内外学者对于添加不同组分填料的硅橡胶基绝热材料进行了诸多研究^[2-6]。此外,还从不同烧蚀条件出发对硅橡胶基绝热材料进行了大量烧蚀试验测试,Nadeem Iqbal 等基于氧乙炔焰对硅橡胶绝热材料进行绝热性能测试^[7];刘洋等利用弯管模拟试验发动机在颗粒冲刷条件下开展了硅橡胶材料的烧蚀特性研究^[8];陈春娟等基于缩比发动机开展了硅橡胶绝热材料的富氧烧蚀试验^[9];王书贤等试验了不同燃气环境对硅橡胶绝热材料烧蚀性能的影响^[10]。国内外关于硅橡胶的烧蚀性能研究多采用氧乙炔焰或者模拟发动机进行测试,由于受到试验设备的限制,其中烧蚀试验中的烧蚀环境可调节性差,同时多数研究只集中于考察单一因素变化对材料烧蚀行为的影响,在影响烧蚀行为因素的综合对比研究方面缺少相关的试验数据^[11]。

1 试验材料及方法

1.1 试样制备

硅橡胶制备所用原材料包括聚二甲基硅氧烷(PDMS);聚甲基苯基硅氧烷(PMPS); SiC ;气相法白炭黑(氧化硅);聚磷酸铵(APP);蒙脱土;碳纤维;芳纶纤维; ZrB_2 ;高硅氧纤维布,其材料配方组成见文献^[12]。

按所列配方称取基胶及各种填料,预混合浸润

4 h 以上,再利用高速分散均质机分散约 0.5 h,然后掺入质量分数为 3% 的正硅酸乙酯和质量分数为 0.5% 的有机锡,搅拌均匀并排泡后用平板模具压制成片,最终在压片表面贴覆高硅氧纤维布制成绝热层材料成品^[12]。

按照试验系统的要求,将材料加工成 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 方形试样块,材料平均密度约为 1.61 g/cm^3 。

1.2 烧蚀试验系统及仪器

烧蚀试验系统以航空煤油和氧气作燃烧剂和氧化剂,经控制台稳定输送至烧蚀发动机内部,燃油经喷嘴雾化后与氧气在燃烧室均匀混合形成可燃混合气体,由高能火花塞点火后在燃烧室内形成高温高压燃气,后经拉瓦尔喷管加速,形成稳定燃气射流。与此同时,粉末通过发动机腔内的送粉口注入燃气射流中,经燃气掺混、加热、加速后形成所需的两相流热环境,从发动机出口喷射至试样中心,对试样进行烧蚀测试,其中两相流中的粒子浓度可控制在 $0 \sim 30\%$ 范围内,烧蚀角度可在 $0 \sim 90^\circ$ 范围内调节,本系统整体原理见图 1^[13]。

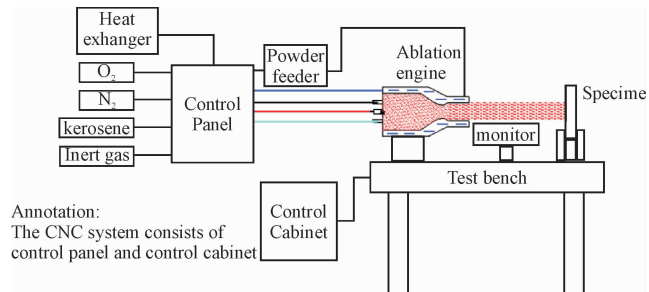


图 1 烧蚀试验系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the experiment system

试验时向燃气射流内注入 Al_2O_3 粉末以模拟固冲补燃室内的多相流环境。所用粉末经烧结破碎法制得,粒径为 $15 \sim 45\ \mu\text{m}$,纯度高于 99.4%。图 2 为 Al_2O_3 粉末的微观形貌图,粉末粒径均匀,呈不规则多角状。

试验后材料分析用到的仪器有捷克 TESCAN

公司生产的扫描电镜及英国 OXFORD 公司提供的 INCA Energy350 能谱仪。

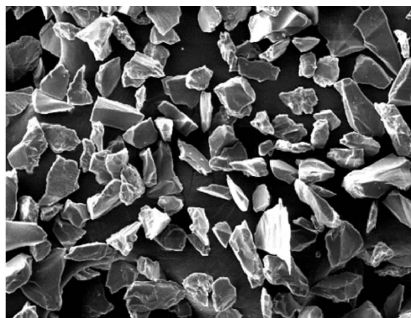


图 2 Al₂O₃ 粉末 SEM 图(×500)

Fig.2 Morphology of the alumina powder (×500)

1.3 烧蚀试验参数

本文从富氧度和粒子浓度 2 个条件出发设计烧蚀方案,其中富氧度 β 由计算公式(1)确定

$$\beta = (m_1 - k_0 m_2) / (m_1 + m_2 + m_3) \quad (1)$$

式中: m_1 为氧气质量流量; m_2 为煤油质量流量; m_3 为送粉载气(氮气)流量; k_0 为满足燃料完全燃烧时的助燃剂与燃料比,在本系统中即煤油的理论混合比,根据煤油牌号确定其值为 3.3。

氧-煤油模拟烧蚀试验系统的粒子浓度 η 为射流中粒子所占的比重,其计算式为:

$$\eta = G / (Q_1 \rho_1 + Q_2 + Q_3 \rho_3 + G) \quad (2)$$

式中: Q_1 为氧气体积流量; ρ_1 为氧气密度; Q_2 为煤油质量流量; Q_3 为载气体积流量; ρ_3 为载气密度; G 为注入射流粒子的质量流量即送粉量。

式(2)中的气体及煤油流量参数通过串联于管路中的流量计采集,粒子质量速率通过标定实验确定。

根据某型固冲发动机补燃室特性参数,经初步等效研究后,设定烧蚀系统初始氧气流量为 338 L/min,煤油流量为 0.146 kg/min,控制燃烧室压强为 0.27 MPa,通过金属熔点法将烧蚀距离(试样距喷管出口的距离)设定为 80 mm^[14],经热力计算和仿真分析得,该条件下到达试样表面的射流温度约为 2 000 K、速度约为 470 m/s,可满足固冲补燃室绝热层材料烧蚀的实际需求^[15]。

由于燃烧室压强变化将对烧蚀焰流的速度产生较大影响,故最终采取保持燃烧室压强稳定,通过控制总质量流量不变,分别调节氧气和煤油流量的方式来实现富氧度的变化。在测试试验中发现由于烧蚀时间过久致使高粒子浓度组的试样烧穿,最终将硅基绝热层材料烧蚀试验的定点烧蚀时间确定为 3 s,烧蚀角度设定为 45°,送粉载气流量设定为 20 L/min。试验共设计 20 组方案(见表 1),每组均使用 3 块试样,以试样烧蚀率均值作为实际烧蚀率。

表 1 绝热层材料烧蚀试验方案

Tab.1 Ablation test scheme for thermal insulation materials

试样 分组	氧气流量 /(L·min ⁻¹)	煤油流量 /(kg·min ⁻¹)	富氧度 /%	粒子浓度 /%
A1				4.0
A2	338	0.146	0	6.0
A3				8.0
A4				10.0
B1				4.0
B2	342	0.138	5	6.0
B3				8.0
B4				10.0
C1				4.0
C2	346	0.132	9	6.0
C3				8.0
C4				10.0
D1				4.0
D2	352	0.124	15	6.0
D3				8.0
D4				10.0
E1				4.0
E2	357	0.117	20	6.0
E3				8.0
E4				10.0

2 结果及讨论

2.1 烧蚀率测算

烧蚀前后利用电子天平(精度 0.1 mg)、千分尺(精度 0.01 mm)和深度尺(精度 0.01 mm)对每块试样进行测量,按照 2 类烧蚀率公式,计算得到最终烧蚀率,结果见表 2。

表 2 试样平均烧蚀率

Tab.2 Mean ablation rates of the samples

试样 分组	平均质量烧蚀率 /(g·s ⁻¹)	平均线烧蚀率 /(mm·s ⁻¹)	燃烧室压强 /MPa
A1	1.187 1	1.703 0	0.268
A2	1.307 8	1.936 3	0.268
A3	1.379 1	2.173 7	0.273
A4	1.525 5	2.585 6	0.276
B1	1.144 0	1.656 7	0.261
B2	1.254 2	1.901 1	0.269
B3	1.345 6	2.085 2	0.271
B4	1.446 5	2.416 7	0.265
C1	1.134 6	1.622 3	0.270
C2	1.236 6	1.890 0	0.270
C3	1.371 6	2.053 0	0.270
C4	1.467 9	2.424 3	0.279
D1	1.116 9	1.455 9	0.262
D2	1.208 0	1.667 7	0.265
D3	1.247 0	1.733 0	0.261
D4	1.343 7	2.114 8	0.270
E1	1.027 1	1.364 1	0.277
E2	1.105 4	1.443 3	0.268
E3	1.179 0	1.578 5	0.269
E4	1.308 6	2.364 4	0.267

图3给出了材料烧蚀率与富氧度和粒子浓度之间的三维曲线图,试验中未能测试的点采用插值法计算,图中可以直观的看到在富氧烧蚀环境下,富氧9%附近存在硅橡胶材料烧蚀的极值点,三维曲面在该值附近出现波峰。利用三维曲面图可以对该材料在不同条件下的烧蚀率进行初步估算。

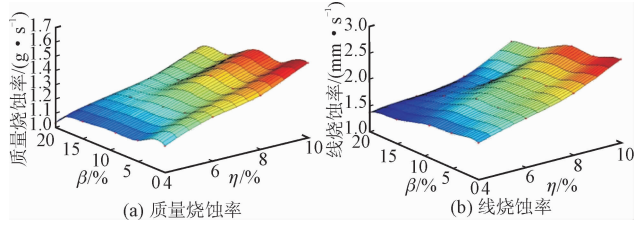


图3 烧蚀率三维曲面图

Fig. 3 Ablation rate three-dimensional surface

控制变量,以各计算组最小烧蚀率为单位1,6%的粒子浓度变化最大可导致28.51%的质量烧蚀率和34.13%的线烧蚀率变化,而约20%的富氧浓度变化最大可导致16.74%质量烧蚀率和24.84%的线烧蚀率变化。规定用烧蚀率变化百分数和要素变化百分数的比值表示各要素的影响因数 δ :

$$\delta = \Delta_{\text{result}} / \Delta_{\text{reason}} \quad (3)$$

显然,粒子浓度的对2类烧蚀率的影响因数 δ 分别为4.75、5.69,富氧对2类烧蚀率的影响因数 δ 分别为0.84、1.24。综上可知,绝热层材料烧蚀率的变化由富氧与粒子浓度共同决定,且粒子浓度对材料烧蚀率的影响更大,在本实验条件下,其主要影响程度约为富氧度的5倍。

2.2 宏观烧蚀形貌分析

烧蚀后所有试样的宏观形貌总体相似,取具有代表性的B13(B1组第3块试样)进行宏观形貌分析,其整体外观见图4(a)。试样经烧蚀后中心存在较大的“烧蚀坑”,如图中圆形区域所示,烧蚀坑在射流入射的45°方向上存在一定的坡度,在粒子的冲蚀作用下,材料中心生成的反应层(陶瓷层和热解层)被破坏,试样中心失去反应层的保护后,原始层重新暴露在烧蚀射流下,加快了材料基体发生相变和热解反应,同时由于射流中心温度高、速度快,热流密度大,对材料的中心处的破坏要强于射流边缘,最终在材料表面留下凹坑;试样角落由于未受到较强冲蚀破坏,在该处仍残留有部分反应层。随着富氧度的增加,试样的烧蚀坑径向尺寸逐渐增大;而粒子浓度的上升在加大了烧蚀坑的中心深度同时减小了角落处陶瓷层的面积。

观察图4(b)中的侧面宏观形貌可知,反应层和原始层之间的分界面明显,但反应层中的陶瓷层和热解层不易区分界定,这也说明了热解层与陶瓷层

在形貌上具有继承性和相似性^[16];且对比不同烧蚀条件下的试样可知,各试样中角落残留的反应层厚度区别不明显。

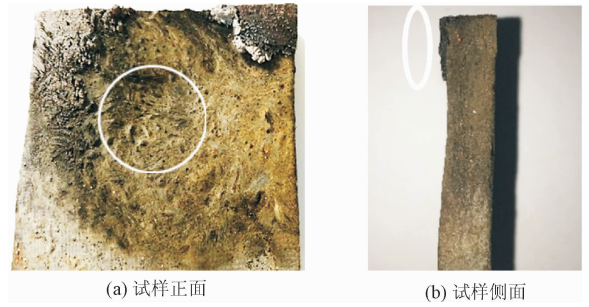


图4 试样B13烧蚀形貌图

Fig. 4 Ablation morphology of the sample B13

2.3 微观烧蚀形貌分析

2.3.1 富氧环境下粒子浓度对试样微观形貌影响

富氧度为5%时,不同粒子浓度条件下角落陶瓷层微观形貌见图5,表3为其对应的元素分析结果。

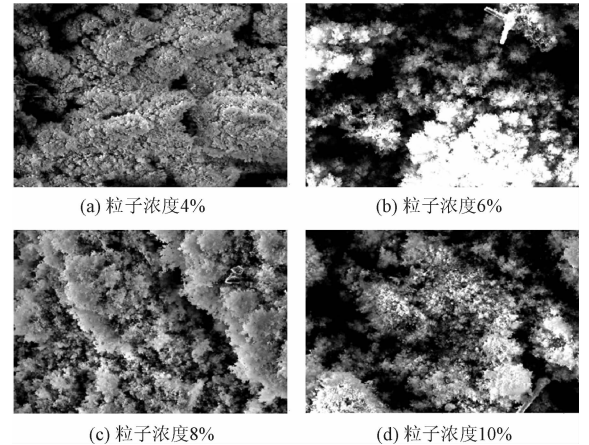


图5 不同粒子浓度条件下试样角落陶瓷层微观形貌($\times 500$)

Fig. 5 Microscopic morphology of corner ceramic layer under different particle concentration ($\times 500$)

表3 不同粒子浓度条件下试样角落陶瓷层原子百分比
Tab. 3 The atomic percent of ceramics in corners under different particle concentration

元素	浓度4%	浓度6%	浓度8%	浓度10%
C	0.47	0.55	0.54	0.38
O	65.95	68.62	65.38	68.28
Al	1.02	0.94	1.82	2.25
Si	32.55	29.89	32.25	29.09

图中均可观察到陶瓷层表面有晶状物质析出,图5(a)中晶状物质致密,随着粒子浓度的逐渐增大,结晶状物质逐渐分散,且有一定程度的破碎,团聚体体积逐渐变小,粒子浓度为10%时,陶瓷层表面物质呈颗粒状分布。根据元素分析结果可知,陶瓷层表面的物质大部分为 SiO_2 ,由于粒子的强侵蚀作用,表面缝隙处嵌有部分 Al_2O_3 ,且 Al_2O_3 的含量

随着粒子浓度增加有所上升^[17]。粒子浓度的提高加强了角落区域处粒子冲刷作用,材料表面析出的大量 SiO_2 晶状物,在粒子的作用下被逐渐打碎,形成分散的颗粒状形貌。

图 6 为富氧度为 5% 时不同粒子浓度条件下试样烧蚀中心的微观形貌图,表 4 给出了其对应的元素分析结果。

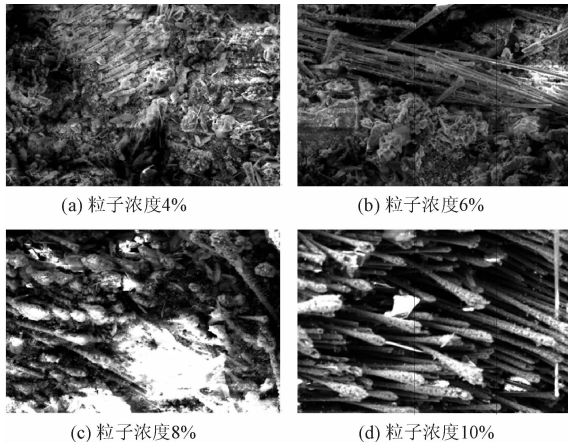


图 6 不同粒子浓度条件下试样中心微观形貌图($\times 500$)
Fig. 6 Microscopic morphology of sample center under different particle concentration ($\times 500$)

表 4 不同粒子浓度条件下试样中心原子百分比
Tab. 4 The atomic percent of sample center under different particle concentration

元素	浓度 4%	浓度 6%	浓度 8%	浓度 10%
C	3.98	4.54	2.63	2.77
O	67.25	64.50	62.96	62.29
Al	1.53	1.83	3.57	4.41
Si	27.23	28.13	30.84	30.53

在试样烧蚀中心均观察到裸露的纤维结构,根据尺寸可知其为碳纤维,由于熔点高,耐烧蚀性能好,纤维周围基体部分在射流环境下逐渐被破坏剥离,露出纤维端头。随着粒子浓度的增加,燃气的机械剥蚀作用加强,导致烧蚀中心处陶瓷层的破坏加速,碳纤维周围基体材料被迅速剥离,纤维的裸露程度逐渐增加,粒子冲刷作用成为材料耗损的主导因素,大部分绝热层材料在被剥离时未完全热解。与表 3 中对比可知,中心区域的 C、Al 元素含量较高,由于试样中心单位时间受到的撞击粒子数量要高于材料角落区域,渗入试样中心处的 Al_2O_3 粒子数量更多,引起 Al 元素的含量上升,同时纤维的裸露致使中心区域的 C 元素含量较角落处更高。

2.3.2 粒子环境下富氧度对试样微观形貌的影响

图 7 显示了粒子浓度为 8% 的试验条件下,不同富氧度条件下试样角落处陶瓷层的微观形貌,表 5 为相应图域的元素分析结果。在绝热层材料试验的参数范围内,富氧度的增加会减缓粒子侵蚀对绝热层材料的作用,根据表 5 中的元素分析可知,图域中大部分物质为 SiO_2 ,在高富氧度的射流环境下, SiO_2 将大量析出,以结晶形式附着于材料表面。

表 5 试样角落陶瓷层元素原子百分比

Tab. 5 The atomic percentage of the ceramic element in the corner of the sample

元素	富氧度 0%	富氧度 5%	富氧度 9%	富氧度 15%	富氧度 20%
C	0.30	0.54	0.54	0.50	0.36
O	66.34	65.91	65.23	67.33	67.30
Al	1.94	2.82	1.50	2.14	1.63
Si	31.42	30.73	32.74	30.03	30.71

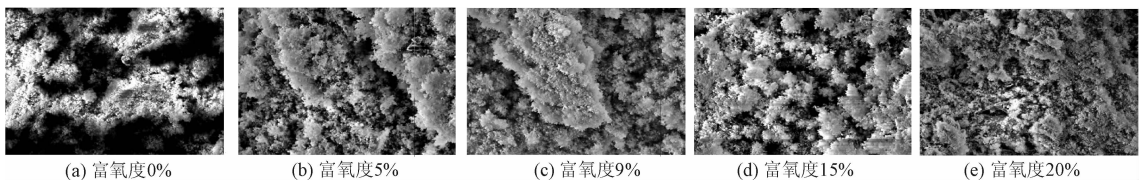


图 7 不同富氧度条件下试样角落陶瓷层微观形貌($\times 500$)

Fig. 7 Microscopic morphology of corner ceramic coatings under different oxygen-enriched conditions ($\times 500$)

为进一步研究富氧环境对材料烧蚀的影响,对图域中的孔隙率进行测定,其孔隙率结果依次为 6%、17.1%、17.4%、21.8%、24.4%,呈现出逐渐增加的趋势,在粒子侵蚀占主导破坏作用的射流环境下,氧化性组分仍会对材料烧蚀行为产生影响,其主要影响机理为射流中富余的氧化性组分渗入陶瓷层内部^[18],在陶瓷层内的孔隙中与材料发生放热的化学反应,加剧氧化过程扩张原有的裂纹孔隙;同时富氧环境的改变促进了 SiO_2 的生成,后通过缝隙从材

料浅层析出,并附着在表面,对粒子的侵蚀起到部分缓冲作用,减缓了材料的损耗。

图 8 显示了粒子浓度为 8% 时,不同富氧度条件下试样烧蚀中心的微观形貌图,表 6 为对应图域的元素分析结果。在整个火焰接触面中,烧蚀中心受粒子侵蚀的作用最为严重,随着富氧度的增加,碳纤维的裸露部分越来越多。由表 6 可知,图域中的主要物质仍以 SiO_2 为主,表明裸露的碳纤维表面附着有 SiO_2 等物质,但与角落处分析结果相比,烧蚀

中心的C元素含量明显增加,且有随富氧度增加而变大的趋势,这与形貌图中显示的现象相一致。增大富氧条件,射流中剩余的氧化性组分增加,多余的氧化性组分与表层接触后逐渐向内部渗透,促使材料的热化学反应加剧,在气流和粒子机械力的共同作用下表面陶瓷层逐渐剥落,在绝热层材料中添加的纤维束主要起到结构增强的作用,其耐腐蚀性能优于绝热层材料本身,在周围基体材料被逐渐破坏掉后,作为增强材料的碳纤维保存下来,其裸露程度随着富氧度增大而增加^[19]。

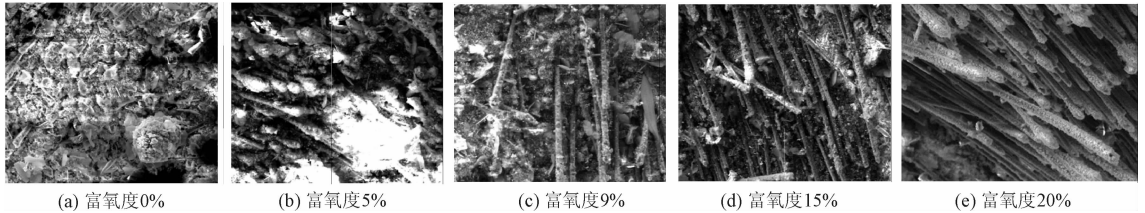


图8 不同富氧度条件试样烧蚀中心微观形貌图($\times 500$)

Fig. 8 Morphology in the center of sample under different oxygen-rich conditions ($\times 500$)

富氧度上升,试样的烧蚀率将有所降低,而结合微观形貌可知高富氧度的条件下材料纤维周围基体材料的消融破坏将加剧,这与材料烧蚀率下降的事实相反,说明富氧度的上升确实减缓了粒子侵蚀方面的破坏。同时可观察到随着富氧度的增加,纤维束端部的棒槌结构愈发明显,表明该结构的生成与富氧度相关,对棒槌结构进行元素分析可知该结构为 SiO_2 ,该附着物对不耐氧烧蚀的碳纤维丝可起到保护作用,同时表面附着 SiO_2 的纤维丝强度较原来有所增强,强化了纤维耐冲蚀性能^[20]。富氧度影响 SiO_2 的生成速率,低富氧度条件下产生的 SiO_2 不足以对材料表面进行的覆盖,纤维丝表面的“保护壳”未完全成型,所以材料烧蚀率呈上升趋势,当富氧度达到一定值时,材料表面完整附着后减缓了粒子作用,转而表现为烧蚀率的下降。

3 结论

1)在试验的参数范围内,富氧度一定时,随粒子浓度的增加,材料的2类烧蚀率均有所增加;而粒子浓度一定时,材料的烧蚀率随着富氧度的增加整体呈现出先上升后下降的趋势,即绝热层材料存在耐富氧烧蚀的极值点,且粒子浓度对材料烧蚀行为的影响大于富氧度对材料烧蚀行为的影响,在本实验条件下,约为富氧度影响程度的5倍。

2)富氧度不变时,粒子浓度变化直接影响材料表面的机械受力状况,较为松脆的反应层一经生成就被粒子侵蚀破坏,将表层以下未完全热解陶瓷化

表6 试样中心元素原子百分比

Tab. 6 The atomic percent in the center of sample surface

元素	富氧度 0%	富氧度 5%	富氧度 9%	富氧度 15%	富氧度 20%
C	1.60	2.63	4.87	5.61	6.23
O	60.90	62.96	64.87	67.45	67.06
Al	1.52	1.61	2.12	2.79	3.11
Si	35.99	32.80	28.14	24.15	23.60

的基体暴露在射流下,失去陶瓷层保护的基体材料将重新进行热解陶瓷化过程,该过程加速了材料的消耗,粒子浓度越高,此动态过程交替越快,导致最终烧蚀率的增加。

3)粒子浓度一定时,氧化性组分的增加将加快绝热层材料的热化学烧蚀过程,导致角落处陶瓷层的表面孔隙率逐渐增大,烧蚀中心区域纤维裸露程度增加。同时富氧度的上升加快了 SiO_2 的生成速率,低富氧度条件下产生 SiO_2 不足以对纤维丝表面进行全面的覆盖,“保护壳”未完全形成,材料烧蚀率呈上升趋势;当富氧度达到一定值时,材料表面附着物有效减缓了粒子侵蚀,最终表现为烧蚀率下降。

参考文献(References):

- [1] MILOS F, CHEN Y K. Comprehensive Model for Multicomponent Ablation Thermochemistry [C] // Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 1997.
- [2] LI H, TAO S, HUANG Y, et al. The Improved Thermal Oxidative Stability of Silicone Rubber by Using Iron Oxide and Carbon Nanotubes as thermal Resistant Additives [J]. Composites Science & Technology, 2013, 76(4): 52-60.
- [3] MA D, TAN J, et al. Curing Characteristics, Morphology, Thermal Stability, Mechanical Properties, and Irradiation Resistance of Methylphenylsilicone/Methylphenylsilicone Rubber Blends [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2014, 131(15): 4401-4404.
- [4] ZHOU C, YU L, LUO W, et al. Ablation Properties of Aluminum Silicate Ceramic Fibers and Calcium

- Carbonate Filled Silicone Rubber Composites [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2015, 132(11).
- [5] YU L, ZHOU S, ZOU H, et al. Thermal Stability and Ablation Properties Study of Aluminum Silicate Ceramic Fiber and Acicular Wollastonite Filled Silicone Rubber Composite [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2014, 131(1): 1-15.
- [6] MU Q, PENG D, JU W, et al. Synthesis and Effects of MDT Silicone Resin on PMPS-Based Ablative Composites [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2015, 132(9): 41571.
- [7] IQBAL N, KHAN M B, SAGAR S, et al. Fabrication and Characterization of Multiwalled Carbon Nanotubes/Silicone Rubber Composites [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2013, 128(4): 2439-2446.
- [8] 刘洋, 关轶文, 吴育飞, 等. 颗粒冲刷条件下硅橡胶绝热层材料烧蚀特性实验研究 [J]. 推进技术, 2017, 38(1): 227-234.
- LIU Y, GUAN Y W, WU Y F, et al. Experimental Investigation on Ablation Characteristic of Silicone Rubber Insulator under Particle Erosion Condition [J]. Journal of Propulsion Technology, 2017, 38(1): 227-234. (in Chinese)
- [9] 陈春娟, 马国富. 富氧环境下燃烧室内绝热层的研究 [J]. 火箭推进, 2004, 30(4): 32-35.
- CHEN C J, MA G F. Study on Internal Insulation of Rocket Engine in Oxidizer Rich Environment [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2004, 30(4): 32-35. (in Chinese)
- [10] 王书贤, 何国强, 李江, 等. 不同燃气环境下硅橡胶绝热材料烧蚀特性试验研究 [J]. 固体火箭技术, 2009, 32(5): 583-587.
- WANG S X, HE G Q, LI J, et al. Experimental Investigation on Ablation Characteristics of Silicon Rubber Insulator in Different Gas Environments [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2009, 32(5): 583-587. (in Chinese)
- [11] KUMAGAI S, SUZUKI M, YOSHIMURA N. Material Screening and Evaluation for Silicone Rubber Insulation with Simple Methods [J]. Transactions-Institute of Electrical Engineers of Japan A, 2008, 121(4): 319-323.
- [12] 张艳, 陈国辉, 王吉贵. 用于冲压发动机补燃室热防护的硅橡胶绝热层研究 [J]. 火炸药学报, 2007, 30(3): 65-68.
- ZHANG Y, CHEN G H, WANG J G. Study on Thermal Protection of Silicon Rubber Insulation Used in the Ramjet Afterburner [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2007, 30(3): 65-68. (in Chinese)
- [13] 查柏林, 黄定园, 乔素磊, 等. C/C 复合材料烧蚀试验及烧蚀机理研究 [J]. 固体火箭技术, 2013, 36(5): 692-696.
- ZHA B L, HUANG D Y, QIAO S L, et al. Research on Ablation Test and Ablative Mechanism of Carbon/Carbon Composite Material [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2013, 36(5): 692-696. (in Chinese)
- [14] 翟鹏. 基于可控两相流的模拟烧蚀/侵蚀试验技术研究 [D]. 西安: 第二炮兵工程大学, 2010.
- ZHAI P. Research on Analogue Ablation/Erosion Experimental Technique Based on Controllable Two-Phase Flow [D]. Xi'an: The Second Artillery Engineering College, 2011. (in Chinese)
- [15] 李理, 杨涛, 程兴华, 等. 固体火箭冲压发动机补燃室硅基绝热层烧蚀模型 [J]. 推进技术, 2012, 33(3): 451-454.
- LI L, YANG T, CHENG X H, et al. Ablation Model of Silicon Insulator in Ramjet Combustion Chamber [J]. Journal of Propulsion Technology, 2012, 33(3): 451-454. (in Chinese)
- [16] 杨栋. 硅橡胶基绝热材料及其热化学烧蚀机理研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
- YANG D. Silicone Rubber Based Insulation Material and Its Thermochemical Ablation Mechanism [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013. (in Chinese)
- [17] 李理, 杨涛, 姜伟. 高速粒子对固冲发动机绝热层的影响 [J]. 弹箭与制导学报, 2012, 32(1): 127-130.
- LI L, YANG T, JIANG W. Effects of High-Velocity Particles on Solid Ramjet Insulator [J]. Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance, 2012, 32(1): 127-130. (in Chinese)
- [18] 王书贤, 李江. 硅橡胶绝热材料热化学烧蚀特征试验分析 [J]. 科学技术与工程, 2015, 15(15): 218-221.
- WANG S X, LI J. Experimental Analysis of Silicon Rubber Insulator Thermo-Chemical Ablation Characteristics [J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(15): 218-221. (in Chinese)
- [19] 栾贻浩. 基体结构与短纤维对硅橡胶耐烧蚀绝热材料性能的影响 [J]. 化工新型材料, 2013, 41(7): 145-148.
- LUAN Y H. Effect of Matrix and Short Fibers on Silicone Rubber Insulation Materials [J]. New Chemical Materials, 2013, 41(7): 145-148. (in Chinese)
- [20] YANG D, ZHANG W, JIANG B. Ceramization and Oxidation Behaviors of Silicone Rubber Ablative Composite under Oxyacetylene Flame [J]. Ceramics International, 2013, 39(2): 1575-1581.